干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

基于微波辐射计的宁夏六盘山西侧大气水汽变化特征

林 彤[1,2,3]， 桑建人[1,2,3]， 姚展予[2,4]， 舒志亮[1,2,3]， 田 磊[1,2,3]，
曹 宁[1,2,3]， 常倬林[1,2,3]

（1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室，宁夏 银川 750002； 2. 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室，北京 100081； 3. 宁夏气象防灾减灾重点实验室，宁夏 银川 750002； 4. 中国气象科学研究院，北京 100081）

摘 要：采用隆德气象站2 a德制微波辐射计与同期1 h降水量资料，利用统计法分析了六盘山脉西侧大气水汽含量以及云液态水含量的时间分布特征，并分析了92次不同降水性质、不同降水量级的降水个例，得到降水前跃增时间的变化特征。剔除降水背景结果统计表明：(1) 六盘山西侧大气水汽含量和云液态水含量有明显的季节变化，其中夏季是大气水汽含量最多的季节，平均为23.44 mm，占年均水汽含量的47.7%。(2) 大气水汽含量和云液态水含量日变化呈一谷一峰分布，春、夏、秋三季均在午后出现最大峰值，冬季在11:00出现峰值；大气水汽含量低值区春、夏、秋季出现在日出前后，冬季出现在22:00。(3) 87.0%的降水个例在降水发生之前大气水汽含量都在12.00 mm以上，且其值随着降水的量级增大而增大。(4) 降水前云液态水含量发生明显跃增现象，春、夏季表现强，根据降水性质及降水量级不同，降水前跃增时间也不同。研究结论对把握人影作业时机具有一定的参考价值。

关 键 词：微波辐射计；大气水汽含量；云液态水含量；六盘山
文章编号：

大气水汽在大气中占比很小，小于大气成分的3%，却是大气中最活跃的元素之一，由于水的相态转换、传输和循环预示着降水天气的发生、发展和消亡，并且对大气辐射、全球能量平衡和气候变化等方面都起着至关重要的作用，因此，及时、准确、连续地获取高精度、高时间分辨率的大气水汽相关资料，对天气预报和提高人工影响天气工作效率等方面具有重要意义[1-3]。

获取大气水汽资料的方法有很多，但随着科学技术的发展，微波辐射计的应用逐渐广泛，其探测水汽的方法也日益成熟。微波辐射计能够连续、自动、长时间地获得大气水汽资料，它通过接收大气中一定波段的微波辐射来探测温度、相对湿度、水汽密度及液态水的垂直分布廓线，具有时间分辨力高、可移动、可操作性强等优点，在资料同化、灾害天气分析等方面得到了较为广泛的应用，并且微波辐射计能够探测到空中云液态水含量的变化情况，可以用于识别和判定人工增雨作业潜势条件[3-4]。随着近几年微波辐射计的推广应用，国内外学者针对其探测精度和数据质量等方面进行了研究，并使用常规观测资料进行对比分析，证明了微波辐射计资料的可靠性。Cossu等[5]将WRF模型模拟的结果与微波辐射计的综合水汽（Integrated water vapour，IWV）和综合云液态水（Integrated liquid water，ILW）测量的结果进行对比，发现二者的IWV吻合度高，平均偏差仅为0.7 mm，而WRF模型得到的ILW高估了晴空出现概率的比例（WRF为83%，微波辐射计为60%）；Steinke等[6]通过对比2个微波辐射计的

收稿日期：2020-06-10； **修订日期**：2020-09-28
基金项目：西北区域人影建设研究试验项目（RYSY201904）；国家自然科学基金面上项目（41775139）；宁夏自然科学基金项目（2020AAC03469）；宁夏自然科学基金项目（2019AAC03255）资助
作者简介：林彤（1993-），女，硕士，助理工程师，主要从事人工影响天气及大气物理方面研究. E-mail: lintong0213@126.com
通讯作者：桑建人（1964-），男，正研级高级工程师，主要从事人工影响天气及大气物理方面研究. E-mail: sangjr@126.com

探测结果,发现测量角度的空间分布和扫描的角分辨率对于获得最佳水汽场有一定影响;Navas-Guzmán 等[7]使用微波辐射计与其他技术同步测量的温度数据,对比结果证明微波辐射计在平流层高度对温度的测量性能良好;He 等[8]采用多层神经网络法分析发现微波辐射计的水汽密度谱与探空观测的水汽密度谱吻合度高;Liu 等[9]对比了 CloudSat 卫星产品和在北极夏季云海研究(ASCOS)航行中获取的微波辐射计(MWR)中云液态水路径的数据,发现二者反演的散点图相关性较差,中分辨率成像光谱仪(MODIS)图像证实了该现象可以由其中 2 d 云量的不均匀性来解释;刘建忠等[10]利用统计法分析了探空和微波辐射计的观测资料,并评价了该型微波辐射计的性能。学者们也对微波辐射计得到的大气水汽含量、云液态水含量等特征量产品进行了研究;Xu 等[11]使用微波辐射计资料发现暴雨发生前约 30 min,云水和水汽密度开始大幅增加;陈添宇等[12]使用地基微波辐射计资料分析了张掖降水过程中的大气水汽含量变化情况,结果表明该地区当大气水汽含量达到某一阈值降水才会发生且雨强与大气水汽含量在时间分布上具有相同趋势;敖雪等[13]使用地基微波辐射计资料分析了降水前 1 h 大气水汽含量、云液态水含量的分布、演变和降水之间的关系。以上研究大都是针对微波辐射计精度或中国中东部地区的研究,对于中国西北地区的研究较少。

西北地区是我国缺水最严重的地区,其降水主要集中在山区,靠山区降水转化为山区冰雪或与冰雪融水相汇合,形成地表径流,成为滋润绿洲的宝贵水源;六盘山位于青藏高原与黄土高原的交汇处,主峰位于宁夏隆德和泾源两县交界处,最高峰达到 2942 m,它是西风带与东亚季风的过渡带,是海洋暖湿气流进入西北内陆的通道之一,也是西北内陆地区空中水汽输送的重要区域。由于六盘山区由南到北气候从半湿润区、半干旱过渡到干旱区,具有大陆性和海洋季风边缘气候特点,且其作为黄土高原重要的水源涵养地,水汽相对较丰富并且由于地形的抬升作用,围绕山脉附近经常形成地形云从而产生降水。因此,开发利用山区的空中云水资源,人工催化增加山区降水成为该地区人影作业的重点,而探究六盘山区的大气水汽含量、云液态水含量等特征量与降水的分布特征,对于进一步研究六盘山区地形云产生的降水特征有重要意义及应用价值,并且可以用于判断该地区云系是否处于降水产生阶段,更好地应用于人工增雨作业,从而开发利用六盘山区的空中云水资源。

1 研究区概况

本文相关数据源于宁夏回族自治区固原市隆德县的隆德国家气象观测站(106°06′E、35°36′N、海拔高度 2079 m),气象观测站位于六盘山脉的西侧,距离山顶最高点约 800 m,其具体地理位置如图 1 所示。六盘山是中国为数不多的西北—东南走向(与南北方向夹角近 30°)的西部山脉,坐落在宁夏回族自治区西南部、甘肃省东部。其山脊海拔超过 2500 m,最高峰米缸山达 2942 m,六盘山是我国西部黄土高原上重要的水源涵养地和风景名胜区,也是泾河、清水河、葫芦河的发源地。六盘山区处于东亚季风的边缘,是海洋暖湿气流进入西北内陆的门户,是维系西北内陆地区空中水汽输送的关键区域,由于其独特的地形作用,随着气流越过山地的云滴,由于地形作用下的辐合抬升往往在未到达背风坡之前的短促时间内增长成降水粒子,经常在该区域内产生降水,因此雨雾日数较多,常年雾日高达 153.4 d。

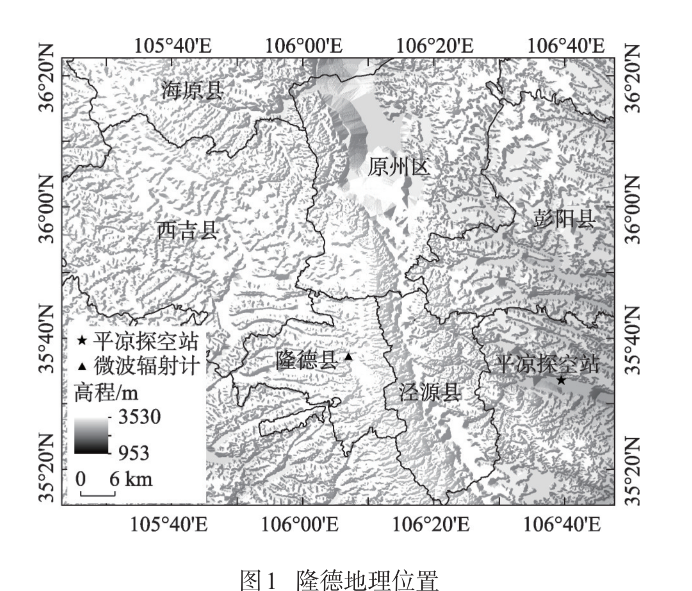


图 1 隆德地理位置

Fig. 1 Geolocation of Longde County

2 数据来源与处理

隆德国家气象观测站布设有一台德国 RPG 公

司的RPG-HATPRO型地基微波辐射计，并已经积累了2 a以上的数据，可以很好的监测六盘山西侧的大气水汽特征量。该仪器采用多通道并行技术进行测量，具有时空分辨率高、全天候和全天时观测的优点，可以实时连续监测并获得0~10 km范围内的大气温、湿度廓线、综合大气水汽含量、云液态水含量、云底高度等数据产品。为检验该型微波辐射计数据的适用性，孙艳桥等[14]利用5种检查方法对微波辐射计数据进行质量控制实验并与同期探空资料比对，结果表明数据质量以晴空最优、云天次之、降水稍差，质量控制结果在各高度层上相关性都处在较高水平；田磊等[15]使用该仪器与同期探空数据对比发现，二者观测的平均温度廓线、水汽密度廓线等相关系数较高，说明该仪器数据可信并且可用度较高。

本文采用2017年12月1日—2019年11月30日的1 h降水量资料与同期同址微波辐射计得到的大气水汽含量和云液态水含量进行统计分析。在处理微波辐射计资料的过程中，将秒数据平均为分钟数据，并将世界时间转换为北京时间。

有研究表明[15-19]，微波辐射计的误差来源之一就是微波辐射计天线罩上附着的液态水导致亮温测量值的偏高。因此，为了避免降水对探测精度的影响，本文分析时剔除微波辐射计所有降水时段的数据，并使用极值检查法和内部一致性检查法剔除异常值，用数理统计分析方法进行数据分析。尝试得到六盘山西侧空中云水的季、月、日变化，并分析降水前一刻大气水汽含量与云液态水含量的变化特征，寻求其对降水发生的指示作用。

3　结果与分析

3.1　六盘山西侧大气水汽及云水的季、月变化特征

由大气水汽含量、云液态水含量与1 h降水量的四季变化图（图2）可见，六盘山地处东亚季风区的边缘，夏季日照丰富，冬季干燥寒冷，大气水汽含量和云液态水含量在夏季达到最大（23.44 mm和0.09 mm），大气水汽含量占年均水汽含量的47.7%，有研究表明，西北地区的水汽输送主要以季风和西风2个环流系统为主，其中夏季从印度洋来的季风所携带的水汽对影响区的降水贡献较高，并且占全年的主要地位[20]；其次是秋季（12.26 mm和0.06 mm）和春季（9.23 mm和0.04 mm），分别占年均水汽含量的24.9%和18.8%；冬季大气中水汽含量最少，形成云的可能性最小，因此冬季的大气水汽含量和云液态水含量（4.26 mm和0.02 mm）显著低于其他季节，且冬季大气水汽含量仅占年均水汽含量的8.6%；降水前大气水汽含量逐渐增加，降水后逐渐减小，且年波动幅度较大，其中春季整体呈增加趋势，秋季整体呈逐渐减小趋势，夏季和冬季增减趋势不明显。云液态水含量在降水前较大并伴随出现跃增现象，该特征对降水的预报和人工影响天气工作有一定的指示作用。

由大气水汽含量、云液态水含量与降水量的月均图（图3）看出大气水汽含量、云液态水含量与降水的分布趋势相似，计算得出，降水量与大气水汽含量相关系数为0.97，降水量与云液态水含量相关系数为0.91，降水量与水汽特征量高度正相关；大气水汽含量和云液态水含量在1—8月逐渐增大，特别是入夏以来大气水汽含量与云液态水含量有明显增加，这与夏季六盘山地区降水频率及降水量的明显增加密切相关，8—11月呈现逐渐减小趋势，12月各表征量最小，出现该分布特征的主要原因是六盘山区夏季受到来自印度洋的西南季风和来自太平洋的东南季风影响，建立了稳定的水汽输送通道，而冬季主要受到来自西伯利亚、内蒙古高压带来的西北、东北偏北风影响，水汽较少且冬季寒冷，虽然宁夏地理位置偏内陆，受季风影响较弱但仍然处于季风区的影响内[21-23]。

降水频率的计算按照雨/雪日（1日内出现降水量≥0.1 mm，当日即被计算为雨/雪日）与计算时段内全部天数的比值进行计算，得到夏季的降水频率最高（46.7%）且量级最大，秋季和春季的降水频率分别为37.9%和34.8%，隆德的冬季（12—1月）气温较低，降水基本是以降雪的形势出现，降水频率为18.3%；以上结论说明六盘山区西侧的空中云水情况和降水有明显的季节变化，且水汽主要集中在夏、秋季，占年均水汽含量的72.6%。

3.2　六盘山西侧大气水汽与降水的日变化

将微波辐射计反演的大气水汽含量、云液态水含量以及1 h降水量资料取小时平均，再计算每个季节相同时刻的平均值，得到六盘山西侧大气水汽四季的日变化特征（图4）。由图4可以看出，大气水汽含量和云液态水含量的四季变化趋势相似，夏季

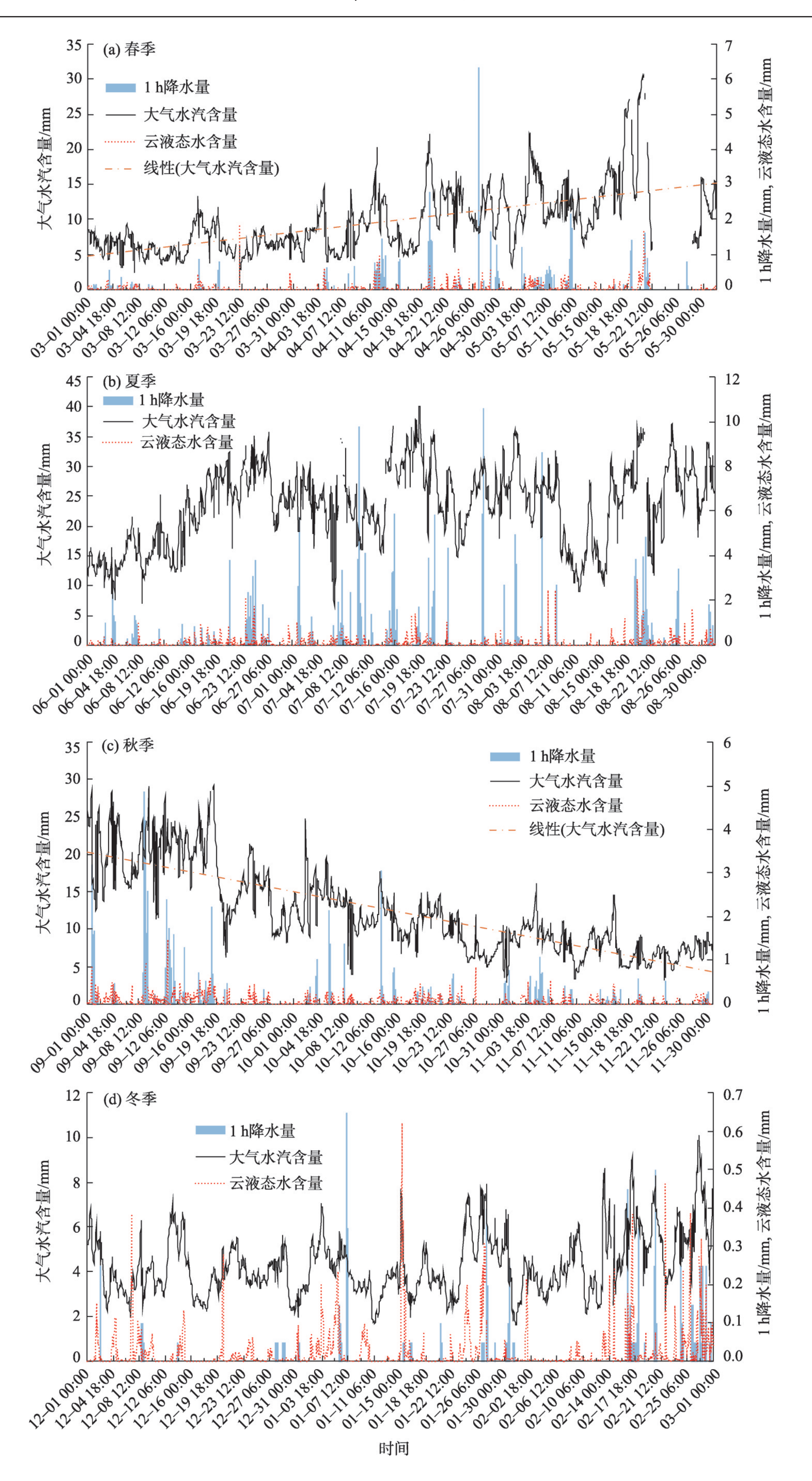


图2 大气水汽含量、云液态水含量与1 h降水量的四季变化

Fig. 2 Seasonal variations of atmospheric water vapor content, liquid water content and 1 hour precipitation

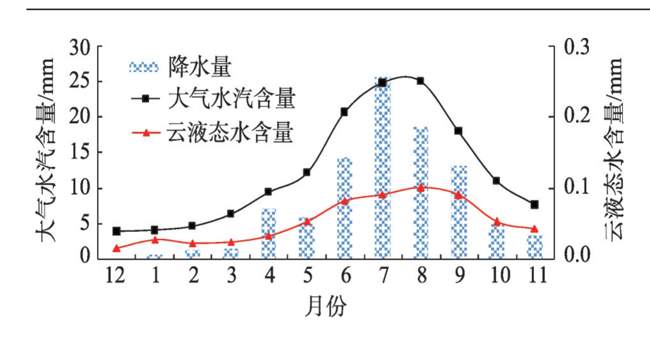


图3 大气水汽含量、云液态水含量与降水量的月均值

Fig. 3 Monthly mean values of atmospheric water vapor content, liquid water content and precipitation

的大气层结稳定度最低，最容易形成午后热对流天气现象[24]，并且有较大的日变化幅度(大气水汽含量日变化差2.58 mm，云液态水含量日变化差0.20 mm)。春季的大气水汽含量日变化差大于秋季，春季的变化范围为8.38~9.74 mm，日变化差为1.36 mm；秋季的变化范围为11.69~12.88 mm，日变化差为1.19 mm。而在冬季，六盘山受北方冷高压控制，大气层结相对稳定，日变化振幅也最小(大气水汽含量日变化差0.27 mm，云液态水含量日变化差0.02 mm)；春、夏、秋、冬四季大气水汽含量从最小值到最大值的变化时间间隔分别为6 h、8 h、6 h和10 h，冬季变化时间最长。

春季降水最大时间段出现在16:00，夏季和秋季分别出现在20:00和03:00，冬季出现在06:00。大气水汽含量和云液态水含量表现为一谷一峰的日变化特征，大气水汽含量低值区春、夏、秋三季均出现在凌晨04:00—08:00之间，而冬季则出现在夜间22:00。云液态水含量春、夏、秋三季的峰值均出现在午后，其中春、秋两季与大气水汽含量峰值出现时间一致，冬季云液态水含量最大值出现在凌晨05:00，最小值在傍晚18:00；春、夏、秋三季大气水汽含量的峰值均出现在午后13:00—15:00之间，冬季在11:00出现最大峰值。出现该日变化特征的原因是由于日出之前地表温度下降，低层大气容易形成逆温层，大气中的水汽不断凝结并降落，使得大气水汽含量不断下降，而日出之后，地表及大气温度逐渐回升，大气对流使得水汽对流至高空中形成云，从而使得大气水汽含量与云液态水含量逐渐增加，并在午后达到最大值，之后又随着气温的逐渐降低，水汽凝结并降落，大气水汽含量和云液态水含量又出现下降趋势。冬季大气水汽含量与云液态水含量的低值区出现在傍晚，是由于在冬季傍晚的山脚下气温偏低导致。

水汽的变化是快速、多变且复杂的过程，每日最大值和最小值出现的具体时间实际都不是一定的，原因目前还不是非常明确，这需要我们以后更加深入细致的研究才能进一步解释。

3.3 降水前特征量变化

3.3.1 六盘山西侧降水前大气水汽含量变化特征

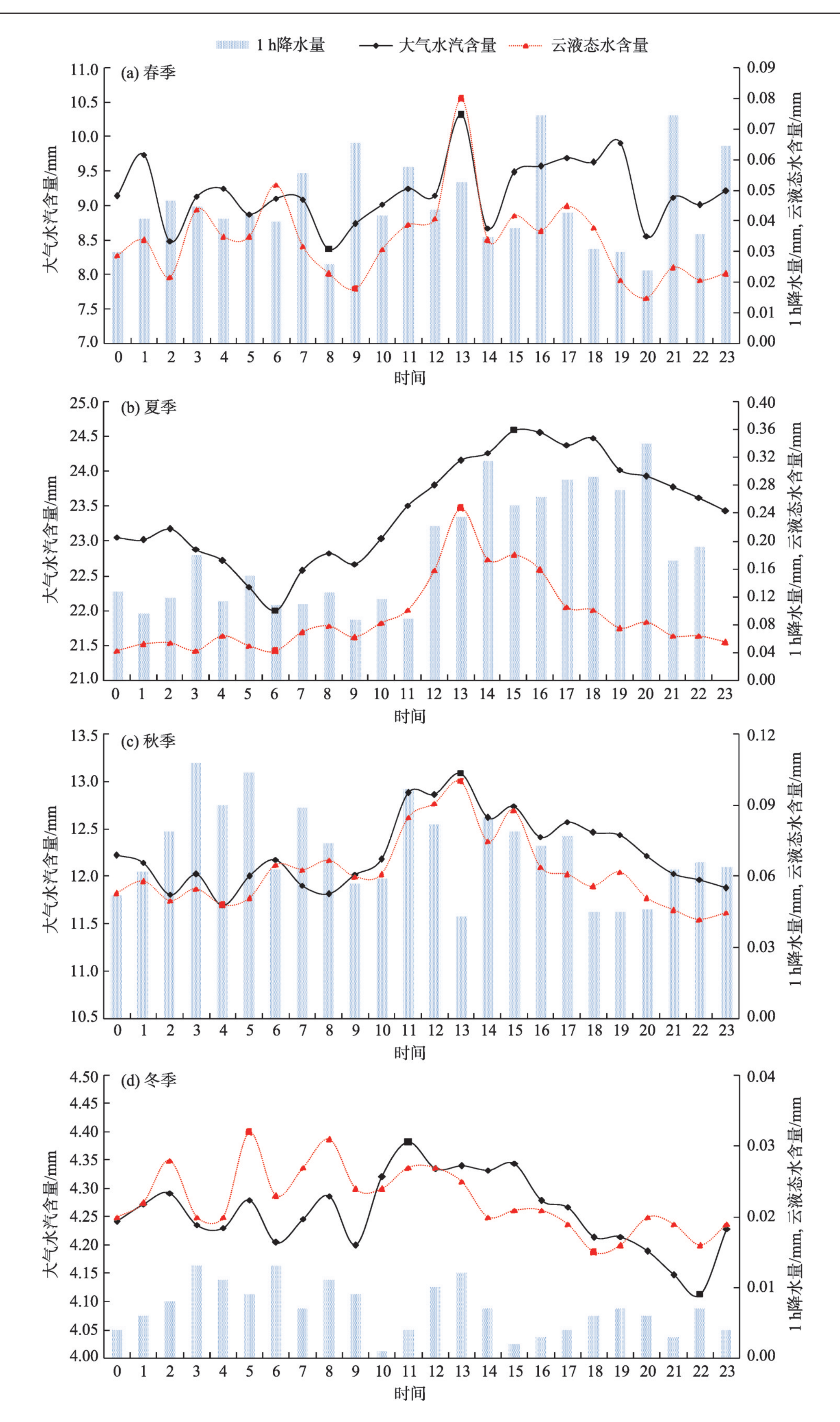
由于降水发生时微波辐射计所测得的结果有较大误差，为了寻找降水前大气水汽含量和云液态水含量的变化特征，我们将2018—2019年典型降雨过程前一刻的大气水汽含量值以及降水前2 h云液态水含量提取出来进行统计分析。

表1统计了2018—2019年92个降水个例(春季21个、夏季35个、秋季36个)的天气情况以及降水前的大气水汽含量，其中天气情况采用24 h降水量进行划分，24 h降水量在0.1~9.9 mm之间为小雨，10.0~24.9 mm之间为中雨，25.0~49.9 mm之间为大雨。

从表中可以看出，小雨发生前，春季大气水汽含量均值为15.82 mm，夏季大气水汽含量均值为30.76 mm，秋季大气水汽含量均值为19.43 mm。中雨发生前，春季大气水汽含量均值为22.04 mm，夏季大气水汽含量均值为31.69 mm，夏季87.5%的中雨发生前大气水汽含量值大于25.00 mm。大雨(只发生在夏季)发生前微波辐射计记录的大气水汽含量均值为37.84 mm，捕捉到的5次大雨过程中大气水汽含量均大于33.49 mm。图5得到降水发生大气水汽含量的比例，春季90.5%的降水个例的大气水汽含量在10.00 mm以上，夏季85.7%的降水个例的大气水汽含量在25.00 mm以上，秋季94.4%的降水个例的大气水汽含量在10.00 mm以上；87.0%的降水个例在降水发生之前大气水汽含量都在12.00 mm以上，并且其值随着降水量级增大而增大。

3.3.2 六盘山西侧降水前云液态水含量变化特征

数据分析过程中发现，降水之前云液态水含量发生跃增现象在春、夏季最为明显，秋季次之，冬季隆德气温较低，降水均以降雪形式发生跃增现象表现最弱，根据降水量的大小以及降水的性质不同，降水前跃增现象发生的时间也不同。为进一步得到降水性质及降水量大小对降水前跃增时间的影响，将92个降水个例按照降水类型和天气情况分类并提取降水前120 min的云液态水含量数据，得到43个阵性降水(降水开始和停止突然并且时间小于3 h)、



注：图中大气水汽含量和云液态水含量的最值均用方块标记点标记；横坐标数值0表示00:00—01:00，以此类推。

图4　六盘山西侧大气水汽含量、云液态水含量与降水量四季的日变化特征

Fig. 4　Seasonal diurnal variation of atmospheric water vapor, liquid water content and precipitation on the west side of Liupan Mountain area

表1 92个降水个例天气情况及降水前大气水汽含量

Tab. 1 Weather conditions of 92 precipitation cases and atmospheric water vapor content before precipitation

日期	降水前大气水汽含量/mm	天气情况	24 h降水量/mm	降雨类型	日期	降水前大气水汽含量/mm	天气情况	24 h降水量/mm	降雨类型
2018年3月4日	11.27	小雨	3.7	连续性	2018年8月1日	33.52	小雨	0.1	阵性
2018年3月5—6日	9.83	小雨	2.0	连续性	2018年8月5日	34.57	小雨	0.2	阵性
2018年3月17日	19.34	小雨	3.2	连续性	2018年8月6日	36.53	中雨	21.6	连续性
2018年3月18日	12.90	小雨	0.1	阵性	2018年8月7日	40.18	小雨	0.5	阵性
2018年3月20日	10.24	小雨	6.1	连续性	2018年8月8日	40.20	中雨	11.7	连续性
2018年3月30日	13.68	小雨	0.4	阵性	2018年8月18日	34.91	小雨	0.2	阵性
2018年4月4—5日	19.55	小雨	4.9	连续性	2018年8月21日	34.84	小雨	0.4	阵性
2018年4月5—6日	6.36	小雨	0.3	阵性	2018年8月21日	35.48	大雨	40.4	连续性
2018年4月11—13日	22.04	中雨	24.2	连续性	2018年8月25日	33.24	小雨	2.2	阵性
2018年4月20日	22.17	小雨	4.9	连续性	2018年9月1—2日	39.61	小雨	5.0	连续性
2018年4月22日	17.11	小雨	0.2	阵性	2018年9月4日	35.86	小雨	4.7	连续性
2018年4月23日	20.95	小雨	1.6	连续性	2018年9月9日	24.52	小雨	2.0	连续性
2018年4月24日	17.56	小雨	1.7	连续性	2018年9月13日	23.38	小雨	0.1	阵性
2018年4月27日	14.98	小雨	0.5	阵性	2018年9月14—15日	24.98	小雨	8.6	连续性
2018年4月28日	16.48	小雨	3.3	阵性	2018年9月16日	24.05	小雨	0.7	连续性
2018年4月30日	16.09	小雨	0.1	阵性	2018年9月17日	27.18	小雨	2.2	阵性
2018年5月5日	16.26	小雨	0.1	阵性	2018年9月18日	27.20	小雨	5.8	连续性
2018年5月9—10日	20.91	中雨	24.6	连续性	2018年9月19日	28.47	小雨	1.9	连续性
2018年5月17日	24.19	小雨	0.6	阵性	2018年9月20日	17.48	小雨	0.8	阵性
2018年5月19日	27.05	中雨	11.1	连续性	2018年9月21日	19.87	小雨	1.0	阵性
2018年5月21日	30.12	中雨	13.3	连续性	2018年9月25日	27.83	小雨	0.9	间歇性
2018年6月3日	21.08	小雨	3.4	连续性	2018年9月27日	21.96	小雨	0.1	阵性
2018年6月6日	21.49	小雨	0.7	阵性	2018年10月2日	13.38	小雨	0.4	阵性
2018年6月8日	15.61	小雨	0.2	阵性	2018年10月8日	16.54	小雨	2.9	阵性
2018年6月10日	17.09	小雨	0.3	阵性	2018年10月13日	17.80	小雨	8.4	连续性
2018年6月11日	18.10	小雨	0.2	阵性	2018年10月14日	13.94	小雨	0.3	阵性
2018年6月15日	29.23	小雨	0.3	阵性	2018年10月18日	12.71	小雨	1.8	间歇性
2018年6月16日	25.40	小雨	0.8	阵性	2018年10月19日	15.88	小雨	1.8	连续性
2018年6月17日	31.09	小雨	2.6	阵性	2018年10月20日	18.21	小雨	2.9	连续性
2018年6月18日	29.25	小雨	2.0	阵性	2018年10月22日	11.21	小雨	0.1	阵性
2018年6月21日	25.97	中雨	10.8	阵性	2018年10月24日	16.92	小雨	0.7	阵性
2018年6月24—25日	33.49	大雨	58.0	连续性	2018年11月4日	12.43	小雨	3.7	连续性
2018年6月30日	34.02	小雨	0.1	阵性	2018年11月5日	10.73	小雨	3.9	连续性
2018年7月1—2日	40.62	大雨	41.7	连续性	2018年11月5—6日	10.63	小雨	3.1	连续性
2018年7月3日	34.18	小雨	9.9	连续性	2018年11月6日	9.74	小雨	1.7	阵性
2018年7月6—8日	37.24	小雨	8.0	间歇性	2018年11月10日	11.13	小雨	2.1	间歇性
2018年7月9日	32.77	小雨	0.2	阵性	2018年11月14日	11.63	小雨	1.1	连续性
2018年7月10—11日	38.16	大雨	89.2	连续性	2018年11月15日	10.11	小雨	1.6	连续性
2018年7月4日	35.33	小雨	2.4	阵性	2018年11月16日	9.40	小雨	4.6	连续性
2018年7月19日	38.06	小雨	9.0	连续性	2019年8月26日	41.45	大雨	26.4	连续性
2018年7月20日	34.84	中雨	12.0	连续性	2019年9月18—19日	27.56	中雨	13.5	连续性
2018年7月21日	39.11	小雨	1.4	阵性	2019年10月3日	26.30	小雨	2.8	连续性
2018年7月23日	37.89	中雨	12.0	连续性	2019年10月4日	27.10	小雨	5.5	连续性
2018年7月24日	31.36	小雨	0.6	阵性	2019年10月5日	24.40	小雨	0.1	阵性
2018年7月31日	31.81	小雨	0.4	阵性	2019年10月6日	23.32	中雨	14.7	连续性
2018年7月31日	35.40	小雨	0.8	阵性	2019年11月1日	17.90	小雨	5.2	连续性

45个连续性降水(降水持续时间长且大于等于3 h)和4个间歇性降水(降水伴有明显断续现象),连续性降水中又分为33个连续性小雨、10个连续性中雨和5个连续性大雨,得到阵性、连续性和间歇性降水前120 min云液态水含量的变化(图6)。

其中,阵性降水在降水之前云液态水含量有显著的跃增现象,跃增时间分布在降水前6~23 min之间,91%的阵性降水分布在前10~20 min之间。将所有阵性降水个例做平均,得到在降水开始前15 min云液态水含量开始跃增,跃增量大约为0.6 mm。

连续性小雨的云液态水含量在降水开始前都小于0.6 mm,在降水前1 h开始平缓增加,增加量为0.2 mm以上,没有明显的跃增时间;连续性中雨个例的云液态水含量在降水开始前40 min内有2个先增后减的变化,具体为降水开始前40 min先增大后减小,降水前20 min快速增大至接近1.0 mm后云液态水含量值又有所减小,在临近降水前4 min再次跃增超过1.0 mm,最后一次跃增值在0.3 mm左右;连续大雨云液态水含量在降水开始前17 min开始剧烈增加,到降水前12 min左右增至1.0 mm以上,在降水前10 min左右有一次剧烈跃增,跃增值大约为0.6 mm,在临近降水前3 min又一次跃增至接近2.0 mm,最后一次跃增值为0.3 mm左右。以上结论与敖雪等[13]的研究结论相似。

间歇性降水个例均为小雨,降水发生前120 min云液态水含量在0.3~0.8 mm之间波动,在临近降水前12 min左右出现跃增现象,至降水前6.5 min达到最大后有所减小,跃增量约0.2 mm。

4 结论与讨论

本文利用地基微波辐射计资料与同址自动站1 h降水量资料分析了六盘山西侧大气水汽含量、云液态水含量与降水量的季节分布特征,与以往研究不同的是,本研究还通过多个个例在不同降水量及降水性质下,对其降水前大气水汽含量值和云液态水含量跃增时间进行分类统计分析,结论对研究区域的人工影响天气降水预判方面提供了基础参考

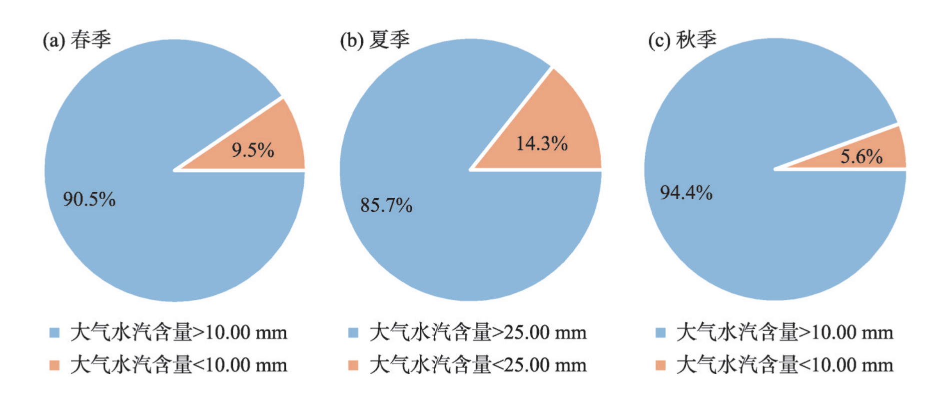
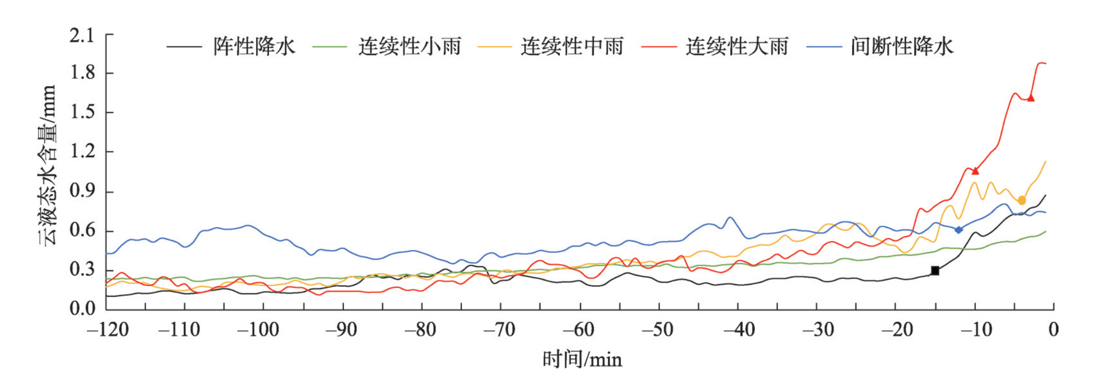


图5 降水发生大气水汽含量比例

Fig. 5 Proportion of atmospheric moisture content in precipitation



注:图中云液态水含量发生跃变的时间点均用标记点标记。

图6 阵性、连续性和间歇性降水前120 min云液态水含量的变化

Fig. 6 Changes of liquid water content 120 min before the formation, continuity and intermittent precipitation

和技术支撑。具体结论如下：

（1）非降水背景下，六盘山脉西侧的大气云水情况有明显的季节变化，且水汽主要集中在夏、秋季，占年均水汽含量的72.6%。春季呈增加趋势秋季呈逐渐减小趋势；夏季大气水汽含量最大且降水频率最高；冬季大气水汽含量最小，仅为4.26 mm，占年均水汽含量的8.6%。一年中8月大气水汽含量最大、12月最小，降水前大气水汽含量逐渐增加，降水后逐渐减小，且年波动幅度较大。

（2）四季大气水汽含量和云液态水含量变化趋势相似，表现为一谷一峰特征，日变化差夏季最大冬季最小。大气水汽含量和云液态水含量春、夏、秋三季均在午后出现最大峰值，日出前后出现最低值；冬季在中午11:00出现最大峰值，夜间22:00出现最低值，该变化特征与地表温度相关。

（3）87.0%的降水个例在降水发生前大气水汽含量都在12.00 mm以上，并且其值随着降水的量级增大而增大。小雨发生前，春季大气水汽含量均值为15.82 mm，夏季为30.76 mm，秋季为19.43 mm。中雨发生前，春季大气水汽含量均值为22.04 mm，夏季为31.69 mm，且夏季87.5%的中雨发生前大气水汽含量的值大于25.00 mm。大雨发生前大气水汽含量均值为37.84 mm，大雨过程中大气水汽含量均大于33.49 mm。

（4）降水前云液态水含量跃增现象春、夏季表现明显。降水前跃增时间的变化特征为：阵性降水开始前15 min发生跃增，跃增量为0.6 mm；连续性小雨降水开始前60 min平稳增加，无明显跃增；连续性中雨降水开始前40 min内有2个先增后减的过程，在临近降水前4 min跃增超过1.0 mm；连续大雨降水前10 min有一次剧烈跃增，跃增值大约为0.6 mm，临近降水前3 min又一次跃增至接近2.0 mm，最后一次跃增值为0.3 mm左右；间歇性降水临近降水前12 min出现跃增现象，跃增量约0.2 mm。

本文得到的是初探性结果，可以为预判降水是否临近、预测云系是否处于降水产生阶段提供一定的技术参考，并且可以为人工增雨作业条件指标提供一定参考价值，但在实际应用中需要对指标进一步检验，并结合其他气象观测仪器进行综合决策。

参考文献（References）

[1] 张秋晨, 龚佃利, 王俊, 等. 基于地基微波辐射计反演的济南地区水汽及云液态水特征[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(5): 35–43. [Zhang Qiuchen, Gong Dianli, Wang Jun, et al. Characteristics of water vapor and liquid water content retrieved by ground-based microwave radiometer in Ji'nan[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2017, 33(5): 35–43.]

[2] 巩宁刚, 孙美平, 闫露霞, 等. 1979—2016年祁连山地区大气水汽含量时空特征及其与降水的关系[J]. 干旱区地理, 2017, 40(4): 762–771. [Gong Ninggang, Sun Meiping, Yan Luxia, et al. Temporal and spatial characteristics of atmospheric water vapor and its relations with precipitation in Qilian Mountains during 1979—2016[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(4): 762–771.]

[3] 张文刚, 徐桂荣, 万蓉, 等. 基于地基微波辐射计的大气液态水及水汽特征分析[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(4): 367–374. [Zhang Wengang, Xu Guirong, Wan Rong, et al. Analysis of the characteristic of liquid water and water vapor detected by ground-based microwave radiometer[J]. Torrential Rain and Disasters, 2015, 34(4): 367–374.]

[4] 李军霞, 李培仁, 晋立军, 等. 地基微波辐射计在遥测大气水汽特征及降水分析中的应用[J]. 干旱气象, 2017, 33(5): 61–69. [Li Junxia, Li Peiren, Jin Lijun, et al. Remote sensing of precipitable water vapor features and application in precipitation analysis by using ground-based microwave radiometer[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 33(5): 61–69.]

[5] Cossu F, Hocke K, Martynov A, et al. Atmospheric water parameters measured by a ground-based microwave radiometer and compared with the WRF model[J]. Atmospheric Science Letters, 2015, 16(4): 465–472.

[6] Steinke S, Lohnert U, Crewell S, et al. Water vapor tomography with two microwave radiometers[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(2): 419–423.

[7] Navas-Guzmán F, Kämpfer N, Schranz F, et al. Intercomparison of stratospheric temperature profiles from a ground-based microwave radiometer with other techniques[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2017, 17(22): 1–28.

[8] He J Y, Sun F L, Zhang S W, et al. The analysis of atmospheric water vapor based on ground-based microwave radiometer[J]. Key Engineering Materials, 2012, 500: 335–340.

[9] Liu S, Heygster G, Zhang S. Comparison of CloudSat cloud liquid water paths in arctic summer using ground-based microwave radiometer[J]. Journal of Ocean University of China, 2010, 9(4): 333–342.

[10] 刘建忠, 何晖, 张蔷. 不同时次地基微波辐射计反演产品评估[J]. 气象科技, 2012, 40(3): 332–339. [Liu Jianzhong, He Hui, Zhang Qiang. Evaluation and analysis of retrieval products of ground-based microwave radiometers at different times[J]. Meteorological Science and Technology, 2012, 40(3): 332–339.]

[11] Xu W J, Liu H Y. Ground-based microwave radiometer profiler observations before a heavy rainfall[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 137: 312–315.

[12] 陈添宇, 陈乾, 丁瑞津. 地基微波辐射仪监测的张掖大气水汽含量与雨强的关系[J]. 干旱区地理, 2007, 30(4): 501–506. [Chen

Tianyu, Chen Qian, Ding Ruijin. Relationship between atmospheric vapor content monitored by ground-based microwave radiometer and rain intensity in Zhangye Prefecture[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(4): 501-506.]

[13] 敖雪, 王振会, 徐桂荣, 等. 地基微波辐射计资料在降水分析中的应用[J]. 暴雨灾害, 2011, 30(4): 358-365. [Ao Xue, Wang Zhenhui, Xu Guirong, et al. Application of microwave radiometer data in precipitation analysis[J]. Torrential Rain and Disasters, 2011, 30(4): 358-365.]

[14] 孙艳桥, 汤达章, 桑建人, 等. RPG_HATPRO_G4型地基微波辐射计温度数据质量控制方法与效果分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1282-1290. [Sun Yanqiao, Tang Dazhang, Sang Jianren, et al. Quality control method and efficiency analysis on temperature data by RPG_HATPRO_G4 type ground-based microwave radiometer[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1282-1290.]

[15] 田磊, 桑建人, 姚展予, 等. 六盘山区夏秋季大气水汽和液态水特征初步分析[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(6): 28-37. [Tian Lei, Sang Jianren, Yao Zhanyu, et al. Characteristics of atmospheric water vapor and liquid water in Liupan Mountain area in summer and autumn[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2019, 35(6): 28-37.]

[16] 徐桂荣, 孙振添, 李武阶, 等. 地基微波辐射计与GPS无线电探空和GPS/MET的观测对比分析[J]. 暴雨灾害, 2010, 29(4): 315-321. [Xu Guirong, Sun Zhentian, Li Wujie, et al. Observational comparison among microwave water radiometer, GPS radiosonde and GPS/MET[J]. Torrential Rain and Disasters, 2010, 29(4): 315-321.]

[17] 刘建忠, 张蔷. 微波辐射计反演产品评价[J]. 气象科技, 2010, 38(3): 325-331. [Liu Jianzhong, Zhang Qiang. Evaluation and analysis of retrieval products of ground-based microwave radiometer[J]. Meteorological Science and Technology, 2010, 38(3): 325-331.]

[18] 刘红燕. 三年地基微波辐射计观测温度廓线的精度分析[J]. 气象学报, 2011, 69(4): 719-728. [Liu Hongyan. The temperature profile comparison between the ground-based microwave radiometer and the other instrument for the recent three years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2011, 69(4): 719-728.]

[19] 赵玲, 马玉芬, 张广兴, 等. MP-3000A微波辐射计的探测原理及误差分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2009, 3(5): 53-57. [Zhao Ling, Ma Yufen, Zhang Guangxing, et al. The principle and error analysis of microwave radiometer MP-3000A[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2009, 3(5): 53-57.]

[20] 王凯, 孙美平, 巩宁刚. 西北地区大气水汽含量时空分布及其输送研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 73-80. [Wang Kai, Sun Meiping, Gong Ninggang. Spatial and temporal distribution and transport of atmospheric water vapor in northwest China[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 73-80.]

[21] 刘洁遥, 张福平, 冯起, 等. 陕甘宁地区降水稳定同位素特征及水汽来源[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2191-2200. [Liu Jieyao, Zhang Fuping, Feng Qi, et al. Stable isotope characteristics of precipitation and sources of water vapor in Shaanxi-Gansu-Ningxia region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(7): 2191-2200.]

[22] 孙艺杰, 刘宪锋, 任志远, 等. 1960—2016年黄土高原多尺度干旱特征及影响因素[J]. 地理研究, 2019, 38(7): 1820-1832. [Sun Yijie, Liu Xianfeng, Ren Zhiyuan, et al. Spatiotemporal variations of multi-scale drought and its influencing factors across the Loess Plateau from 1960 to 2016[J]. Geographical Research, 2019, 38(7): 1820-1832.]

[23] 常倬林, 崔洋, 张武, 等. 基于CERES的宁夏空中云水资源特征及其增雨潜力研究[J]. 干旱区地理, 2015, 38(6): 175-188. [Chang Zhuolin, Cui Yang, Zhang Wu, et al. Characteristics and developing potential of cloud water resource in Ningxia with the CERES data[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(6): 175-188.]

[24] 黄建平, 何敏, 阎虹如, 等. 利用地基微波辐射计反演兰州地区液态云水路径和可降水量的初步研究[J]. 大气科学, 2010(3): 548-558. [Huang Jianping, He Min, Yan Hongru, et al. A study of liquid water path and precipitable water vapor in Lanzhou area using ground-based microwave radiometer[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010(3): 548-558.]

Statistical analysis of water vapor change characteristics over the west valley of Liupan Mountain area based on microwave radiometer

LIN Tong[1,2,3], SANG Jianren[1,2,3], YAO Zhanyu[2,4], SHU Zhiliang[1,2,3], TIAN Lei[1,2,3], CAO Ning[1,2,3], CHANG Zhuolin[1,2,3]

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, China Meteorological Administration, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 2. Key Laboratory for Cloud of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. Ningxia Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 4. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The climate in the Liupan Mountain area, northwest China changes from south to north (from a semihumid zone to a semiarid zone to an arid zone) and has the characteristics of both a continental and a marine monsoon edge climate. As an important water conservation area of the Loess Plateau, the Liupan Mountain area is relatively rich in water vapor, and because of the uplift of the terrain, topographic clouds often form around the mountains, producing precipitation. Thus, the development and utilization of the mountains as air resources and artificial increase in the precipitation in this mountainous area have become key figure assignments in the region. To develop the atmospheric water resources over the Liupan Mountain area using precipitation enhancement techniques, it is necessary to first understand the atmospheric water vapor field in the region and characteristics of the liquid water content in the clouds that produce precipitation. To date, however, there has been little research undertaken in this area. In this paper, data collected between 2018 and 2019 by a microwave radiometer (RPG-HATPRO-G4, RPG for short) situated at the Longde National meteorological station in the west valley of the Liupan Mountain area (in the southern Ningxia Hui Autonomous Region of China) were used to explore the characteristics of the changes on the atmospheric water vapor content [RPG integrated water vapor (IWV)] and the cloud liquid water content [RPG liquid water path (LWP)] seen over time in the west valley of the Liupan Mountain area, with statistical analysis methods conducted on 92 precipitation events of varying natures and precipitation levels. One significant characteristic of the results obtained is the curves seen in the LWPs; the LWPs jumped before raining on the ground in the in situ observations, and 87.0% of all precipitation events had an IWV value of more than 12 mm before raining; this IWV value increased with the amount of precipitation. The results also show that this jumping phenomenon was stronger in spring and summer than in autumn and winter and that the advanced time seen in different precipitation events changed with the varying natures and levels of precipitation. The IWV and LWP values also changed significantly according to the season. The maximum levels were always seen in summer, reaching 23.44 mm, which accounts for 47.7% of the annual average. Additionally, the diurnal variations show that the IWV and LWP curves include one valley and one peak; this peak came shortly after midday Beijing time in spring, summer, and autumn, but at 22:00 in winter. These preliminary findings are provided as a technical reference in the prediction of the proximity of precipitation and whether a cloud system is in its precipitation generation stage. The results of this paper are of greatest importance in the provision of a theoretical basis and technical support for the timing of weather modification operations. However, as a practical matter, it is necessary to further inspect the index using other meteorological observation instruments.

Key words: microwave radiometer; atmospheric water vapor content; cloud liquid water content; Liupan Mountain area